

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ / COMPUTER MODELING AND DESIGN AUTOMATION

DOI: <https://doi.org/10.60797/itech.2024.4.3>

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИ ИОННОМ ЛЕГИРОВАНИИ ПУТЕМ НАХОЖДЕНИЯ МИНИМУМА ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ МЕТОДОМ ДАВИДОНА-ФЛЕТЧЕРА-ПАУЭЛЛА

Научная статья

Кузнецов П.С.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-5459-7883;

¹ АО «ГосНИИП», Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kuziapavel[at]mail.ru)

Аннотация

Данная работа посвящена применению метода Давидона-Флетчера-Пауэлла для поиска минимума целевой функции при расчете параметров профиля концентрации при ионном легировании. В качестве математической модели мишени при ионной имплантации была взята двухслойная структура (SiO₂ + Si) как наиболее близкая к практической кремниевой технологии. При моделировании ионной имплантации использовалась диффузионная модель Бирсака. Для проведения моделирования и оптимизации, на основе математической модели ионной имплантации, диффузионной теории Бирсака и метода Давидона-Флетчера-Пауэлла была написана программа и проведены соответствующие расчеты. Разработанный алгоритм показал свою работоспособность и возможность его использования для нахождения начальных параметров при ионном легировании.

Ключевые слова: ионная имплантация, диффузионная теория Бирсака, метод Давидона-Флетчера-Пауэлла, минимум целевой функции, оптимизация.

CALCULATION OF CONCENTRATION PROFILE PARAMETERS IN ION DOPING BY FINDING THE MINIMUM OF THE TARGET FUNCTION BY THE DAVIDON-FLETCHER-POWELL METHOD

Research article

Kuznetsov P.S.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-5459-7883;

¹ JSC "GosNIIP", Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (kuziapavel[at]mail.ru)

Abstract

This work is dedicated to the application of the Davidon-Fletcher-Powell method to find the minimum of the target function in the calculation of concentration profile parameters during ion doping. A two-layer structure (SiO₂ + Si) as the closest to practical silicon technology was taken as a mathematical model of the target during ion implantation. The Birsak diffusion model was used in the modelling of ion implantation. To carry out the simulation and optimization, based on the mathematical model of ion implantation, the Biersack diffusion theory and the Davidon-Fletcher-Powell method, a program was written, and the corresponding calculations were carried out. The developed algorithm has shown its performance and the possibility of using it to find the initial parameters for ion doping.

Keywords: ion implantation, Biersack diffusion theory, Davidon-Fletcher-Powell method, minimum of target function, optimization.

Введение

Ионная имплантация в последние годы стала одним из основных методов легирования материалов при производстве структур БИС и СБИС [1], [2], [3], [4], [5]. Данная технология подразумевает, что заряженные частицы управляемого потока легирующей примеси бомбардируя твердое тело, внедряются, изменяя его электрофизические, оптические и другие свойства. Среди основных достоинств метода ионного легирования можно выделить возможность точно и воспроизводимо дозировать внедряемую примесь и получать высокую точность заданного профиля.

Процесс ионной имплантации часто проводится через диэлектрические слои. Для этого существуют различные причины:

- избежание загрязнения полупроводника;
- регулирование распределения глубины;
- исключение образования каналов;
- технологические причины.

Для того чтобы точно рассчитать распределение примеси по глубине в многослойной структуре, требуется решение транспортных уравнений.

Целью данной работы является нахождение начальной дозы легирования и начальной энергии иона для заданного профиля при проведении ионной имплантации. Расчеты предполагается проводить на основе диффузионной теории Бирсака при использовании оптимизации методом Давидона-Флетчера-Пауэлла.

Профили распределения двухслойных мишеней

Для предотвращения загрязнения кремния, создания рассеивающего слоя или регулирования глубины залегания ионов, легирование примеси проводится через тонкие маскирующие слои, такие как SiO₂ Si₃N₄. Чтобы точно вычислить распределение примеси по глубине, можно воспользоваться методом Монте-Карло. Но это требует больших затрат машинного времени.

Для практических потребностей кремниевой технологии можно использовать простую модель, предложенную в [12] и пригодную для материалов, имеющих близкие средние атомные номера и массы. Это условие выполняется для большинства композиций используемых с кремнием, например, SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃ и т.д. На рис.1 приводится схематическое изображение этой модели.

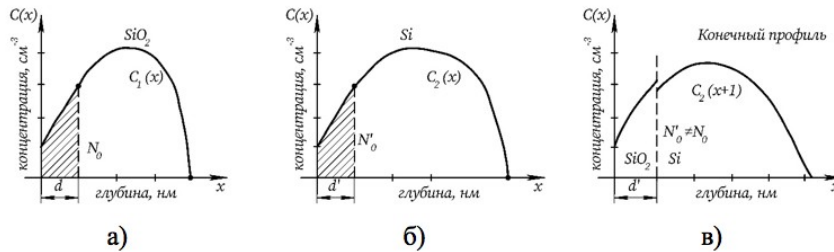


Рисунок 1 - Схематическое изображение численной модели для имплантации в многослойные структуры
DOI: <https://doi.org/10.60797/itech.2024.4.3.1>

Примечание: $C_1(x)$ – профиль концентрации в материале 1 (SiO₂) [маска];

$C_2(x)$ – профиль концентрации в материале 2 (Si) [подложка];

N_0 – количество ионов примеси на глубине

В предположении легирования через толстый слой окисла ($d > R_{p1}$, d – толщина окисла) и гауссовского распределения профилей в окисном слое $N_1(x)$ и подложке $N_2(x)$ распределение примеси определяется выражениями:

$$N_1(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_{p1}} \cdot \exp\left(-\frac{(R_{p1} - x)^2}{2 \cdot \Delta R_{p1}^2}\right), \quad 0 \leq x \leq d$$

$$N_2(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_{p2}} \cdot \exp\left(-\frac{(d + (R_{p1} - d) \cdot \Delta R_{p2} / \Delta R_{p1} - x)^2}{2 \cdot \Delta R_{p2}^2}\right), \quad x \geq d; \tag{1}$$

где $R_{p1}, \Delta R_{p1}, R_{p2}, \Delta R_{p2}$ – параметры распределения примеси в первом и втором слоях, соответственно.

Ошибка при использовании (1) равна

$$\eta = \frac{R_{p2} - R'_{p2}}{R_{p2}},$$

где $R'_{p2} = R_{p1} \cdot \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}}$.

Выражение (1) получается из распределения концентрации примеси в толстом слое окисла преобразованием плотности с помощью масштабирующего $\Delta R_{p2} / \Delta R_{p1}$. Однако для случая тонкого слоя $d \ll R_{p1}$ пробег в подложке $R'_{p2} = R_{p2}$.

Поскольку форма профиля концентрации примеси в кремнии обычно важнее, чем в слое окисла, то для тонких слоев и произвольного профиля распределения можно использовать следующие соотношения:

$$N_1(x) = \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}} \cdot C\left(\frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}} \cdot x\right), \quad x \leq d;$$

$$N_2(x) = C\left(x - d \cdot \left(1 - \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}}\right)\right), \quad x \geq d. \tag{2}$$

Данная модель дает хорошие результаты, если ионы концентрируются во втором слое.

Для уточнения профиля распределения в обоих предельных случаях (случай толстого и тонкого слоев) может быть проведено дальнейшее усовершенствование модели.

С этой целью рассчитывать профиль распределения $N'_1(x)$ в материале 1 (формула (1a) и (2a) для толстого и тонкого слоев, соответственно) и полное количество атомов N_{K1} , внедренных в область 1 толщиной d :

$$N_{K1} = \int_0^d N_1(x) dx. \quad (3)$$

Затем определяется профиль распределения $N_1'(x)$ в мишени из материала 2, в предположении отсутствия маскирующего слоя на поверхности, и толщина слоя на поверхности, и толщина слоя d' , содержащего N_{K1} атомов:

$$N_{K2} = N_{K1} = \int_0^{d'} N_1'(x) dx. \quad (4)$$

Окончательный профиль распределения состоит из профиля $N_1(x)$ в области 1 (от поверхности мишени до глубины d) и профиля $N_2(x)$, рассчитываемого формулам (16) или (26), для толстого или тонкого слоев, соответственно, начинающегося с глубины d' .

Диффузионная теория Бирсака

В теории, предложенной Бирсаком [13], [14], процесс замедления имплантируемых ионов описывается диффузионной моделью, в которой вычисляется средний поправочный косинус ионной траектории во время замедления. Поэтому ионы изменяют направление движения после каждого столкновения, они будут в среднем все больше и больше отклоняться от своего первоначального направления. В свою очередь, потери энергии при ядерных столкновениях, обусловленных передачей импульса от иона, не имеют однозначной связи с углом φ . Направление движения иона можно описывать полярным ψ и азимутальными δ углами, отмечая их на единичной сфере. Поскольку направления движения после каждого столкновения изменялись случайно, то статическое движение на единичной сфере, определяемое диффузным процессом, аналогично броуновскому движению.

Если теперь рассмотреть функцию распределения W полярного угла ψ или направляющего косинуса $\eta = \cos \psi$, то оказывается, что первоначально эта дельта-функция при $\psi = 0$ или $\eta = 1$, а затем при замедлении иона распределение вероятностей уширяется диффузным способом до тех пор, пока ион, наконец, полностью не «забудет» своё первоначальное направление и в конце траектории все направления не станут равновероятными. Эти соображения приводят к диффузному уравнению:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{d}{d\eta} \left((1 - \eta^2) \frac{dW}{d\eta} \right). \quad (5)$$

Для вычисления длины проективного пробега нет необходимости явно проходить функцию W , а достаточно вычислить среднее значение направляющего косинуса $\bar{\eta}$ непосредственно из уравнения (5), которое оказывается равным $\bar{\eta} = e^{-2\tau}$.

Связь между τ и энергетическими потерями находится с помощью соотношения Эйнштейна и имеет вид:

$$\tau = -\frac{M_2}{4M_1} \int_{E_0}^E \frac{dE \cdot S_n}{E(S_n + S_e)}, \quad (6)$$

где M_1 и M_2 – масса иона и мишени, E – энергия налетающей частицы, S_n – тормозная способность, S_e – эффективное торможение.

Это приводит к следующим уравнениям для пробега R и проектного пробега R_p :

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n + S_e}, \quad (7)$$

$$R_p = \int_0^{E_0} e^{-2\tau} \frac{dE}{S_n + S_e}. \quad (8)$$

Каждый прямолинейный элемент траектории иона проецируется на ось x умножением его длины на направляющий косинус. Длину проективного пробега можно вычислить нахождением τ из (6) и последующей подстановкой в (7). Однако алгоритм, разработанный Бирсаком, дает возможность вычислить R_p , ΔR_p и боковой пробег ΔR_{pL} :

$$R_p(E + \Delta E) = R_p(E) \cdot \left(1 - \frac{M_2}{2 \cdot M_1} \cdot \frac{S_n}{S_e + S_n} \cdot \frac{\Delta E}{E} \right) + \frac{\Delta E}{S_e + S_n}, \quad (9)$$

$$\xi(E + \Delta E) = \xi(E) + \frac{2R_p}{S_e + S_n} \cdot \Delta E, \quad (10)$$

$$R_{pL}(E + \Delta E) = \Delta R_{pL}^2(E) + \left[\xi(E) - 2\Delta R_{pL}^2(E) \right] \frac{M_2}{M_1} \cdot \frac{S_n}{S_e + S_n} \cdot \frac{\Delta E}{E}, \quad (11)$$

$$\xi = R_p^2 + \Delta R_p^2 + \Delta R_{pL}^2. \quad (12)$$

Уравнения (9)-(12) легко программируются для быстрых итерационных вычислений R_p , ΔR_p и ΔR_{pL} , что позволяет проводить машинные вычисления. Для замедляющей способности S_e принимается выражение теории Линдхарда-Шарфа-Шиотта [15], [16]:

$$S_e = -\frac{1}{N} \left(\frac{dE}{dx} \right) \cdot e = k' \cdot E^{1/2}. \quad (13)$$

Для S_n можно использовать аналитическое приближение, например:

$$S_n = F \cdot \frac{0,5 \cdot \ln(1+\varepsilon)}{\varepsilon+0,107 \cdot \varepsilon^{0,3754}}, \quad (14)$$

где $F = 181 \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot N \cdot a}{1 + \frac{M_2}{M_1}}$;

$$a = 0,568 \cdot \left(Z_1^{0,23} + Z_2^{0,23} \right);$$

$$\varepsilon = f \cdot E;$$

$$f = \frac{69,4 \cdot a \cdot M_2}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot (M_1 + M_2)}.$$

Метод Давидона-Флетчера-Пауэлла

Метод Давидона-Флетчера-Пауэлла (ДФП) основан на использовании соотношений $x_m = x_0 - G^{-1}(x_0)g(x_0)$ и $x_{i+1} = x_i - \lambda_i G^{-1}(x_i)g(x_i)$, где длина шага λ_i определяется одномерным поиском в направлении $G^{-1}(x_i)g(x_i)$.

Однако в данном случае не требуется на каждом шаге вычислять обратный гессиан $G^{-1}(x_i)$, так как направление поиска на шаге i является направлением $-H_i g(x_i)$, где H_i – положительно определенная симметричная система, которая обновляется на каждом шаге, как это будет описано ниже. В пределе матрица H становится равной обратному гессиану.

Начнем поиск из начальной точки x_0 , взяв в качестве начальной матрицу H_0 (обычно единичную матрицу, хотя в этом случае может подойти любая симметричная положительно определенная матрица). Итерационная процедура может быть представлена следующим образом (вместо $g(x_i)$ удобнее g_i):

1. На шаге i имеются точка x_i и положительно определенная симметричная матрица H_i .

2. В качестве направления поиска взять направление

$$d_i = -H_i g_i.$$

3. Чтобы найти функцию λ_i минимизирующую функцию $f(x_i + \lambda_i d_i)$, произвести одновременный поиск вдоль прямой $x_i + \lambda_i d_i$.

4. Положить

$$v_i = \lambda_i d_i.$$

5. Положить

$$x_{i+1} = x_i + v_i.$$

6. Найти $f(x_{i+1})$ и g_{i+1} . Завершить процедуру, если величины $|g_{i+1}|$ или $|v_{i+1}|$ достаточно малы. В противном случае продолжить.

Из соотношения $g(x_{i+1})^T p_i = 0$, следует что $g_{i+1}^T v_i = 0$.

7. Положить

$$u_i = g_{i+1} - g_i.$$

8. Обновить следующую матрицу H следующим образом:

$$H_{i+1} = H_i + A_i + B_i,$$

где

$$A_i = v_i v_i^T / (v_i^T u_i);$$

$$B_i = -H_i u_i u_i^T H_i / (u_i^T H_i u_i).$$

9. Увеличить i на единицу и вернуться на шаг 2.

Метод ДФП использует как идеи Ньютона-Рафсона, так и свойство сопряженных направлений, и при применении для минимизации квадратичной функции n переменных он сходится не более чем за n итераций. Это весьма мощная оптимизационная процедура, очень эффективная при оптимизации большинства функций независимо от того, квадратичны они или нет [18], [19], [20]. На рис. 2 представлена блок-схема метода.

Результаты моделирования и оптимизации

Для проведения моделирования и оптимизации, на основе представленных выше математической модели ионной имплантации, диффузионной теории Бирсака и метода Давидона-Флетчера-Пауэлла была написана программа, позволяющая автоматически проводить расчеты. Проверка работоспособности, полученной программы проводилась с помощью контрольного примера, позволяющего получить заданный профиль с приращением во всех направлениях, имея следующие параметры:

- энергия иона – 87 кэВ;
- доза легирования – 50000000 1/мкм².

Далее задавая различные ошибки начальных параметров было рассчитано за сколько итераций и насколько точно с помощью метода Давидона-Флетчера-Пауэлла будут получены правильные (оптимальные) значения параметров, соответствующие заданному профилю. Результаты работы программы представлены в Табл.1.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Все точки которые были заданы в качестве начальных, показали хорошие результаты работы программы. Средняя погрешность по энергии составила 0,033%. Средняя погрешность у дозы легирования 1,012%. В процессе проверки не были замечены никакие закономерности в увеличении или уменьшении погрешностей, т.к. погрешность в дозе легирования почти в 1,5% была замечена сразу же в первой точке, но потом на протяжении 10 точек погрешность была меньше 1%, а иногда меньше 0,1%. Потом резкий скачок до 3,6% и опять в течении 5 точек очень низкая погрешность. В измерении №15 (ошибка в задании параметров составляла 50%) программа нашла точки, наиболее точно соответствующие необходимому значению. При задании ошибки в 100% программа дала погрешность по дозе почти 9%, поэтому дальнейшее увеличение ошибки и проверка программы не проводилась.

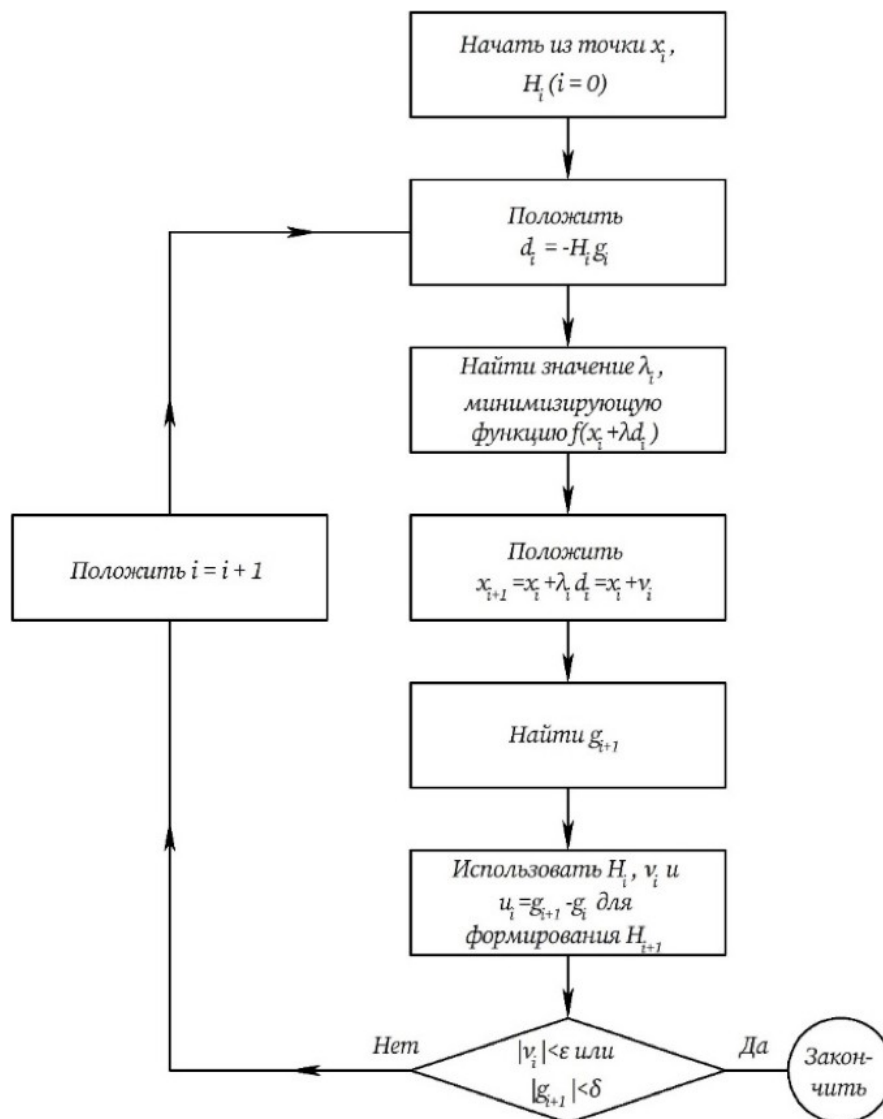


Рисунок 2 - Блок-схема алгоритма оптимизации методом Давидона-Флетчера-Пауэлла [18]
DOI: <https://doi.org/10.60797/itech.2024.4.3.2>

Таблица 1 - Результаты поиска параметров ионного легирования
DOI: <https://doi.org/10.60797/itech.2024.4.3.3>

Ошиб. в %	№ изм.	Кол-во итераций	Нач. энергия, КэВ	Нач. доза, 1/мкм ²	Получ. энергия, КэВ	Получ. доза, 1/мкм ²	Погрешн. энергии, %	Погрешн. дозы, %
10	1	38	78,3	45·10 ⁷	87,021	4926729 7,74	0,024	1,465
	2	25	95,7	45·10 ⁷	87,009	4985216 6,06	0,010	0,296
	3	35	78,3	55·10 ⁷	87,001	4999250	0,001	0,015

						1,66		
20	4	26	104,4	$40 \cdot 10^7$	86,995	5009749 6,95	0,006	0,195
	5	37	104,4	$60 \cdot 10^7$	87,014	4980585 2,08	0,016	0,388
	6	28	69,6	$60 \cdot 10^7$	86,998	5010423 3,76	0,002	0,208
	7	52	69,6	$40 \cdot 10^7$	87,004	4993706 7,8	0,005	0,126
30	8	13	113,1	$35 \cdot 10^7$	87,005	4963347 8,74	0,006	0,733
	9	33	113,1	$65 \cdot 10^7$	87,001	4998445 1,59	0,001	0,031
	10	37	60,9	$65 \cdot 10^7$	86,993	5012098 2,28	0,008	0,242
40	11	45	52,2	$30 \cdot 10^7$	87,016	4993366 3,52	0,018	0,133
	12	36	121,8	$30 \cdot 10^7$	87,114	4819018 2,33	0,131	3,620
	13	50	121,8	$70 \cdot 10^7$	86,996	5006733 3,81	0,005	0,135
	14	29	52,2	$70 \cdot 10^7$	86,99	5018626 5,96	0,011	0,373
50	15	47	43,5	$25 \cdot 10^7$	87,001	4999941 2,33	0,001	0,001
	16	33	130,5	$25 \cdot 10^7$	87,002	4996814 8,13	0,002	0,064
	17	29	130,5	$75 \cdot 10^7$	86,991	5018132 1,21	0,010	0,363
	18	36	43,5	$75 \cdot 10^7$	86,924	5057185 5,6	0,087	1,144
75	19	216	152,25	$125 \cdot 10^7$	87,062	4874590 8,84	0,071	2,508
	20	29	152,25	$87,5 \cdot 10^7$	86,966	5011779 0,97	0,039	0,236
100	21	15	174	$100 \cdot 10^7$	87,21	4551528 8,85	0,241	8,969
Средняя погрешность							0,033	1,012

Заключение

Исходя из представленных выше данных можно сделать вывод о возможности использования метода Давидона-Флетчера-Пауэлла для поиска оптимальных параметров ионного легирования. Разработанная Программа показала свою работоспособность, а предложенный метод оптимизации свою адекватность и пригодность для решения поставленной задачи. Однако при проведении расчетов следует учесть, что наименьшая погрешность получается при задании параметров с ошибкой менее 100%. Данный факт указывает на необходимость проведения начальной подготовки перед проведением моделирования и расчетов с целью получения наилучшего результата.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.60797/itech.2024.4.3.4>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.60797/itech.2024.4.3.4>

Список литературы / References

1. Анищик В.М. Модификация инструментальных материалов ионными и плазменными пучками / В.М. Анищик, В.В. Углов. — Минск : БГУ, 2003. — 191 с.

2. Гридчин А.В. Введение в современную микро- и наносистемную технику / А.В. Гридчин. — Москва; Вологда : Инфра-инженерия, 2024. — 232 с.
3. Воротынцев В.М. Базовые технологии микро- и нанoeлектроники / В.М. Воротынцев, В.Д. Скупов. — Москва : Проспект, 2019. — 519 с.
4. Родионов Ю.А. Технологические процессы в микро- и нанoeлектронике / Ю.А. Родионов. — Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. — 352 с.
5. Pocaterra M. TCAD investigation of the transport of carriers deposited by alpha particles in silicon carbide power Schottky devices / M. Pocaterra, M. Ciappa // *Microelectronics Reliability*. — 2021. — 126. — DOI: 10.1016/j.microrel.2021.114317.
6. Zhang S. Surface modification of polymers by ion irradiation: Reactivity principle and application / S. Zhang, Y. Liu, S. Lv et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. — 2023. — 543. — DOI: 10.1016/j.nimb.2023.165097.
7. Yin R. Physical mechanism of field modulation effects in ion implanted edge termination of vertical GaN Schottky barrier diodes / R. Yin, C. Li, B. Zhang et al. // *Fundamental Research*. — 2022. — 2. — P. 629–634. — DOI: 10.1016/j.fmre.2021.11.027.
8. Magalhaes S. Modelling the strain build-up in nitrogen implanted tungsten films on silicon substrates / S. Magalhaes, R. Mateus, M. Dias et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. — 2023. — 537. — P. 81–87. — DOI: 10.1016/j.nimb.2023.02.006.
9. Jiménez-Riobóo R.J. Boron-doped diamond by 9 MeV microbeam implantation: Damage and recovery / R.J. Jiménez-Riobóo, N. Gordillo, A. de Andrés et al. // *Microelectronics Reliability*. — 2021. — 126. — DOI: 10.1016/j.carbon.2023.04.004.
10. Lerat J.-F. Boron emitter formation by plasma immersion ion implantation in n-type PERT silicon solar cells / J.-F. Lerat, T. Desrues, J. Le Perchec et al. // *Energy Procedia*. — 2016. — 92. — P. 697–701. — DOI: 10.1016/j.egypro.2016.07.046.
11. Yamaguchi N. Plasma immersion ion implantation for tunnel oxide passivated contact in silicon solar cell / N. Yamaguchi, R. Müller, C. Reichel et al. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. — 2024. — 268. — DOI: 10.1016/j.solmat.2024.112730.
12. Риссел Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге. — Москва : Наука, 1983. — 360 с.
13. Biersack J.P. Calculation of projected ranges — analytical solutions and a simple general algorithm / J.P. Biersack // *Nuclear Instruments and Methods*. — 1981. — Vol. 182–183. — P. 199–206. — DOI: 10.1016/0029-554X(81)90688-1.
14. Холодкова Х.В. Математическое моделирование технологических процессов / Х.В. Холодкова, С.А. Смирнов. — Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2019. — 88 с.
15. Быкадырова Г.В. Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и нанoeлектроники / Г.В. Быкадырова, А.Ю. Ткачев, Л.А. Бормонов и др. — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2016. — 120 с. — URL: <https://rucont.ru/efd/604082> (дата обращения: 10.08.2024)
16. Смирнов В.И. Физико-химические основы технологии электронных средств / В.И. Смирнов. — Ульяновск : УлГТУ, 2005. — 112 с.
17. Mlazi N.J. Mathematical modeling and extraction of parameters of solar photovoltaic module based on modified Newton–Raphson method / N.J. Mlazi, M. Mayengo, G. Lyakurwa et al. // *Results in Physics*. — 2024. — 57. — DOI: 10.1016/j.rinp.2024.107364.
18. Банди Б. Методы оптимизации / Б. Банди. — Москва : Радио и связь, 1988. — 128 с.
19. Bundgaard-Nielsen M. A modified Davidon-Fletcher-Powell method for minimizing a function / M. Bundgaard-Nielsen, P.E. Rønø // *The Chemical Engineering Journal*. — 1973. — 5. — P. 103–106. — DOI: 10.1016/0300-9467(73)85012-9.
20. Fang B. Nonlinear vibration analysis of double-walled carbon nanotubes based on nonlocal elasticity theory / B. Fang, Y.-X. Zhen, C.-P. Zhang et al. // *Applied Mathematical Modelling*. — 2013. — 37. — P. 1096–1107. — DOI: 10.1016/j.apm.2012.03.03.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Anischik V.M. Modifikatsija instrumental'nyh materialov ionnymi i plazmennymi puchkami [Modification of instrumental materials by ion and plasma beams] / V.M. Anischik, V.V. Uglov — Minsk : BGU, 2003. — 191 p. [in Russian]
2. Gridchin A.V. Vvedenie v sovremennuju mikro- i nanosistemnuju tehniku [Introduction to modern micro- and nanosystem technology] / A.V. Gridchin — Moscow; Vologda : Infra-inzhenerija, 2024. — 232 p. [in Russian]
3. Vorotyntsev V.M. Bazovye tehnologii mikro- i nanoelektroniki [Basic technologies of micro- and nanoelectronics] / V.M. Vorotyntsev, V.D. Skupov — Moscow : Prospekt, 2019. — 519 p. [in Russian]
4. Rodionov Ju.A. Tehnologicheskie protsessy v mikro- i nanoelektronike [Technological processes in micro- and nanoelectronics] / Ju.A. Rodionov — Moscow; Vologda : Infra-Inzhenerija, 2019. — 352 p. [in Russian]
5. Pocaterra M. TCAD investigation of the transport of carriers deposited by alpha particles in silicon carbide power Schottky devices / M. Pocaterra, M. Ciappa // *Microelectronics Reliability*. — 2021. — 126. — DOI: 10.1016/j.microrel.2021.114317.
6. Zhang S. Surface modification of polymers by ion irradiation: Reactivity principle and application / S. Zhang, Y. Liu, S. Lv et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. — 2023. — 543. — DOI: 10.1016/j.nimb.2023.165097.

7. Yin R. Physical mechanism of field modulation effects in ion implanted edge termination of vertical GaN Schottky barrier diodes / R. Yin, C. Li, B. Zhang et al. // *Fundamental Research*. — 2022. — 2. — P. 629–634. — DOI: 10.1016/j.fmre.2021.11.027.
8. Magalhaes S. Modelling the strain build-up in nitrogen implanted tungsten films on silicon substrates / S. Magalhaes, R. Mateus, M. Dias et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. — 2023. — 537. — P. 81–87. — DOI: 10.1016/j.nimb.2023.02.006.
9. Jiménez-Riobóo R.J. Boron-doped diamond by 9 MeV microbeam implantation: Damage and recovery / R.J. Jiménez-Riobóo, N. Gordillo, A. de Andrés et al. // *Microelectronics Reliability*. — 2021. — 126. — DOI: 10.1016/j.carbon.2023.04.004.
10. Lerat J.-F. Boron emitter formation by plasma immersion ion implantation in n-type PERT silicon solar cells / J.-F. Lerat, T. Desrues, J. Le Perchec et al. // *Energy Procedia*. — 2016. — 92. — P. 697–701. — DOI: 10.1016/j.egypro.2016.07.046.
11. Yamaguchi N. Plasma immersion ion implantation for tunnel oxide passivated contact in silicon solar cell / N. Yamaguchi, R. Müller, C. Reichel et al. // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. — 2024. — 268. — DOI: 10.1016/j.solmat.2024.112730.
12. Rissel H. Ionная имплантация [Ion implantation] / H. Rissel, I. Ruge. — Moscow : Nauka, 1983. — 360 p. [in Russian]
13. Biersack J.P. Calculation of projected ranges — analytical solutions and a simple general algorithm / J.P. Biersack // *Nuclear Instruments and Methods*. — 1981. — Vol. 182–183. — P. 199–206. — DOI: 10.1016/0029-554X(81)90688-1.
14. Holodkova H.V. Математическое моделирование технологических процессов [Mathematical modeling of technological processes] / H.V. Holodkova, S.A. Smirnov. — Ivanovo : Ivan. state chemical.-technol. Univ., 2019. — 88 p. [in Russian]
15. Bykadyrova G.V. Приборно-технологическое проектирование компонентной базы микро- и нанoelektroniki [Instrumentation and technological design of the component base of micro- and nanoelectronics] / G.V. Bykadyrova, A.Ju. Tkachev, L.A. Bormonotov et al. — Voronezh : Publishing House VSU, 2016. — 120 p. — URL: <https://rucont.ru/efd/604082> (accessed: 10.08.2024) [in Russian]
16. Smirnov V.I. Физико-химические основы технологии электронных средств [Physico-chemical fundamentals of electronic media technology] / V.I. Smirnov. — Ulyanovsk : USTU, 2005. — 112 p. [in Russian]
17. Mlazi N.J. Mathematical modeling and extraction of parameters of solar photovoltaic module based on modified Newton–Raphson method / N.J. Mlazi, M. Mayengo, G. Lyakurwa et al. // *Results in Physics*. — 2024. — 57. — DOI: 10.1016/j.rinp.2024.107364.
18. Bandi B. Методы оптимизации [Optimization methods] / B. Bandi. — Moscow : Radio and Communications, 1988. — 128 p. [in Russian]
19. Bundgaard-Nielsen M. A modified Davidon-Fletcher-Powell method for minimizing a function / M. Bundgaard-Nielsen, P.E. Rønø // *The Chemical Engineering Journal*. — 1973. — 5. — P. 103–106. — DOI: 10.1016/0300-9467(73)85012-9.
20. Fang B. Nonlinear vibration analysis of double-walled carbon nanotubes based on nonlocal elasticity theory / B. Fang, Y.-X. Zhen, C.-P. Zhang et al. // *Applied Mathematical Modelling*. — 2013. — 37. — P. 1096–1107. — DOI: 10.1016/j.apm.2012.03.03.